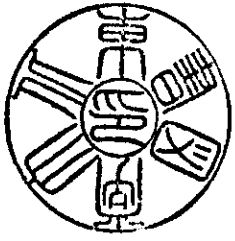




血栓の形成・崩壊・移動および塞栓とその成長による重要臓器梗塞の力学的メカニズム

著者	山口 隆美
URL	http://hdl.handle.net/10097/39575



血栓の形成・崩壊・移動および塞栓とその成長による 重要臓器梗塞の力学的メカニズム

(研究課題番号 16200031)

平成 16 年度～18 年度科学研究費補助金〔基盤研究(A)(2)〕研究成果報告書

平成 19 年 5 月

研究代表者 山口 隆美

(東北大学 大学院工学研究科 教授)

血栓の形成・崩壊・移動および塞栓とその成長による 重要臓器梗塞の力学的メカニズム

(研究課題番号 16200031)

平成 16 年度～18 年度科学研究費補助金〔基盤研究(A)(2)〕研究成果報告書

平成 19 年 5 月

研究代表者 山口 隆美

(東北大学 大学院工学研究科 教授)

は し が き

本報告書は、平成 16 年 4 月から平成 19 年 3 月までの 3 年間に於いて、科学研究費補助金(基盤研究(A)(2), 課題番号 16200031) により行われた研究の成果をまとめたものである。

血栓は、肺梗塞、脳梗塞など、重篤な臓器梗塞の主因の 1 つであり、その適切な治療法を確立することは、医療分野における必須の課題である。そのためには、血栓の形成と崩壊、血栓の血流による移動、および塞栓とその成長といった、一連のプロセスのメカニズムを明らかにする必要がある。従来の研究においては、マクロ現象論的な観点から、血流および血管壁面の力学状態が、血栓形成に重要な影響を与えることが示唆されてきた。しかしながら、血栓形成を担う血小板の粘着・凝集は、よりミクロなレベルにおける生活性因子の活性度変化などが、力学的因子と密接に関連して生じた結果である。本研究では、脳、心臓、肺など重要な臓器の梗塞症の予知および治療の確立を目指した基礎研究として、血栓の形成と崩壊、血栓の血流による移動、および塞栓とその成長といった一連のプロセスについて、その力学的メカニズムを明らかにすることを旨とし、計算力学的手法と *in vitro* 実験を駆使して、血管閉塞現象が本質的に有する、空間的および時間的にマルチスケールな振る舞いを詳細に検討したものである。

本研究で得られた成果の要約は以下の通りである。

1. 血小板凝集に起因する一次血栓形成過程の生体力学的メカニズムを検討するため、生物学的因子による血小板凝集を血小板間のばね力によって表現し、ストークス動力学法や粒子法を用いて血流下における血小板血栓形成の計算力学シミュレーションモデルを構築した。このモデルにより、血小板凝集における生物学的な因子と、血流による流体力学的な因子との関連を直接的に検討することが可能となり、両因子の連成効果が血栓の形成、成長および崩壊といった一連の過程を決定することを明らかとした。
2. 血流下における赤血球の変形運動挙動を検討するために、エネルギー最小化原理に基づくばねモデルを用いた赤血球流動の計算力学モデルを構築した。同モデルを用いた数値シミュレーションにより、微小循環における単一および複数の赤血球の変形運動が、赤血球の変形特性とヘマトクリット値に影響を受けることを示した。さらに、同モデルにより、赤血球の変形挙動と、その結果として生じる見かけの血流特性との関連を定量的に評価し、血球同士の相互作用が血流特性を決定付ける因子であることを明らかとした。
3. マイクロ PIV 装置を用いた血流観察装置を用いて、微小流路内の血流速度を定量的に計測する手法を開発した。同装置により、個々の赤血球の運動状態の評価と、三次元的な血流特性の定量的な評価が同時に可能となった。ヘマトクリット値に応じて血流速度の時空間的な揺らぎが生じることを明らかとし、血球の力学的な相互作用が微小循環における血流特性を支配することを示した。

4. 地球シミュレーターによる大規模計算を援用した赤血球流動の計算力学シミュレーションを行い、 μm オーダーの血球レベルから cm オーダーの大血管レベルに至る血流特性を検討した。同手法により、赤血球の血管内における分布や、それらが血流の非ニュートン特性に与える影響を直接的に示した。同シミュレーション手法により、血流特性のマルチスケール性を定量的に評価することが可能となり、それを数理的にモデル化することが可能となった。

5. 赤血球が一次血栓形成に与える影響を検討するため、ストークス動力学法や粒子法を用いた血流シミュレーションにより、血流下における赤血球運動と血栓形成の連成問題を直接的に取り扱う計算力学シミュレーションモデルを構築した。同モデルにより、血栓形成において赤血球が抑制的に働くことや、崩壊した血栓の大きさや力学的特性が血流速度に影響を受けることを示した。以上より、異なる種類の血球間における力学的および生物学的な相互作用が、血栓形成過程において重要な役割を果たすことが分かった。

6. 心臓から大動脈における血流特性の詳細を検討するため、左心室モデルと大動脈モデルをそれぞれ用いた計算力学シミュレーションを行った。さらに、両モデルを結合して、左心室・大動脈を一体としたモデルを構築し、心臓・大血管内部の血流の統合シミュレーション手法を提案した。同手法は患者毎に異なる心臓・大血管の運動特性や幾何的形狀を詳細に反映して解析することが可能であり、MRI により計測される生体内の血流状態をよく表現することが示された。以上より、血栓形成を決定付ける血流の渦構造やよどみ点の詳細を評価する上で、同シミュレーション手法が実用的な手段として有用であることを確認した。

以上のように、血球レベルから心臓・大血管レベルに至る血流現象に対して、その力学的メカニズムを種々の時空間的階層において明らかとし、さらに、各階層における現象を総合して検討を進めたことで、血栓形成過程の時空間的なマルチスケール性に対して、重要な生体力学的知見を得た。本研究で提案した血流の計算力学シミュレーション手法は、ミクロからマクロに至る血栓形成現象と、それによる臓器梗塞の予知や治療を定量的に捉える上で実用的な手法を提供するものである。

最後に、本研究を遂行するにあたりご支援いただいた各位に心から感謝申し上げます。

研 究 組 織

研究代表者：山口 隆美（東北大学大学院工学研究科・教授）

研究分担者：和田 成生（大阪大学大学院基礎工学研究科・教授）^{*1}

研究分担者：坪田 健一（東北大学大学院工学研究科・助手）

研究分担者：石川 拓司（東北大学大学院工学研究科・助教授）^{*2}

研究分担者：今井 陽介（東北大学大学院工学研究科・助手）^{*2}

*1 平成 17 年 3 月まで東北大学大学院工学研究科・助教授

*2 平成 18 年 4 月以降，研究分担者

交付決定額（配分額）

（金額単位：千円）

	直接経費	間接経費	合計
平成 16 年度	23,200	6,960	30,160
平成 17 年度	5,300	1,590	6,890
平成 18 年度	5,300	1,590	6,890
合計	33,800	10,140	43,940

研究発表

(1) 査読付き論文

- Y. Feng, S. Wada, K. Tsubota and T. Yamaguchi, Growth of Intracranial Aneurysms Arised from Curved Vessels under the Influence of Elevated Wall Shear Stress - A Computer Simulation Study, JSME International Journal, Series C, Vol. 47, pp. 1035-1042, 2004.
- M. Nakamura, S. Wada, T. Mikami, A. Kitabatake, T. Karino and T. Yamaguchi, Effect of Flow Disturbances Remaining at the Beginning of Diastole on Intraventricular Diastolic Flow and Colour M-mode Doppler Echocardiograms, Medical and Biological Engineering and Computing, Vol. 42, pp. 509-515, 2004.
- 中村匡徳, 和田成生, 三神大世, 山口隆美, 左心室拡張機能とカラーMモード・ドップラ画像との関係 (三次元 CFD モデルによる計算力学的検討), 日本機械学会論文集 A 編, Vol. 70, pp. 1254-1261, 2004.
- B.B. Lieber, M. Siebes and T. Yamaguchi, Correlation of Hemodynamic Events with Clinical and Pathological Observations, Annals of Biomedical Engineering, Vol. 33, pp. 1695-1703, 2005.
- M. Nakamura, S. Wada, T. Karino and T. Yamaguchi, Effects of a Ventricular Untwisting on Intraventricular Diastolic Flow and Color M-mode Doppler Echocardiograms, Technology and Health Care Vol. 13, pp. 269-280, 2005.
- S. Yokosawa, M. Nakamura, S. Wada, H. Isoda, H. Takeda and T. Yamaguchi, Quantitative Measurements on the Human Ascending Aortic Flow Using 2D Cine Phase-Contrast Magnetic Resonance Imaging, JSME International Journal, Series C, Vol. 48, pp. 459-467, 2005.
- Y. Feng, S. Wada, K. Tsubota and T. Yamaguchi, The Application of Computer Simulation in the Genesis and Development of Intracranial Aneurysms, Technology and Health Care, Vol. 13, pp. 281-291, 2005.
- R. Lima, S. Wada, K. Tsubota and T. Yamaguchi, Confocal Micro-PIV Measurements of Three-dimensional Profiles of Cell Suspension Flow in a Square Microchannel, Measurement Science and Technology, Vol. 17, pp. 797-808, 2006.
- M. Nakamura, S. Wada and T. Yamaguchi, Computational Analysis of Blood Flow in an Integrated Model of the Left Ventricle and the Aorta, Journal of Biomechanical Engineering, Vol. 128, pp. 837-843, 2006.
- K. Tsubota, S. Wada, H. Kamada, Y. Kitagawa, R. Lima and T. Yamaguchi, A Particle Method for Blood Flow Simulation, — Application to Flowing Red Blood Cells and Platelets —, Journal of the Earth Simulator, Vol. 5, pp. 2-7, 2006.
- K. Tsubota, S. Wada and T. Yamaguchi, Particle Method for Computer Simulation of Red Blood Cell Motion in Blood Flow, Computer Methods and Programs in Biomedicine, Vol. 83, pp. 139-146, 2006.
- K. Tsubota, S. Wada and T. Yamaguchi, Simulation Study on Effects of Hematocrit on Blood Flow Properties Using Particle Method, Journal of Biomechanical Science and Engineering, Vol. 1, pp. 159-170, 2006.
- T. Yamaguchi, T. Ishikawa, K. Tsubota, Y. Imai, M. Nakamura and T. Fukui, Computational

- Blood Flow Analysis — New Trends and Methods, Journal of Biomechanical Science and Engineering, Vol. 1, pp. 29-50, 2006.
- 坪田健一, 和田成生, 山口隆美, 赤血球の変形能が血流に及ぼす影響(粒子法シミュレーションによる検討), 日本機械学会論文集B編, Vol. 72, pp. 1483-1489, 2006.
- 山口隆美, 心臓・血管系の臨床医療を支援する生体力学シミュレーションシステム, 血管医学, Vol. 7, pp. 97-103, 2006.
- 鎌田裕基, 坪田健一, 和田成生, 山口隆美, 血小板の凝集による一次血栓の形成・崩壊の粒子法シミュレーション, 日本機械学会論文集B編, Vol. 72, pp. 1109-1115, 2006.
- T. Fukui, K. H. Parker, K. Tsubota, S. Wada and T. Yamaguchi, Differentiation of Stenosed and Aneurysmal Arteries by Pulse Wave Propagation Analysis Based on a Fluid-Solid Interaction Computational Method, Technology and Health Care, Vol. 15, pp. 79-90, 2007.
- T. Ishikawa, N. Kawabata, Y. Imai, K. Tsubota and T. Yamaguchi, Numerical Simulation of a Low-hematocrit Blood Flow in a Small Artery with Stenosis, Journal of Biomechanical Science and Engineering, Vol. 2, pp. 12-22, 2007.
- K. Yano, D. Mori, K. Tsubota, T. Ishikawa, S. Wada and T. Yamaguchi, Analysis of Destruction Process of the Primary Thrombus under the Influence of the Blood Flow, Journal of Biomechanical Science and Engineering, Vol. 2, pp. 34-44, 2007.
- R. Lima, S. Wada, M. Takeda, K. Tsubota and T. Yamaguchi, In Vitro Confocal Micro-PIV Measurements of Blood Flow in a Square Microchannel: The Effect of the Haematocrit on Instantaneous Velocity Profiles, Journal of Biomechanics, in press, 2007.
- T. Fukui, K. H. Parker, Y. Imai, K. Tsubota, T. Ishikawa, S. Wada and T. Yamaguchi, Effect of Wall Motion on Arterial Wall Shear Stress, Journal of Biomechanical Science and Engineering, in press, 2007.

(2) 国際会議発表

- T. Yamaguchi, Perspectives of Computational Cardiovascular Biomechanics, The 11th National Computational Fluid Dynamics Conference, 2004.
- S. Wada, M. Sato, K. Tsubota, R. Kobayashi and T. Yamaguchi, Simulation of Rouleaux Formation of Elastic Red Blood Cells Based on Energy Minimum Principles, The 14th European Society of Biomechanics (ESB) conference, 2004.
- K. Tsubota, S. Wada and T. Yamaguchi, Coupled Analysis for Blood Cell Motion and Plasma Flow Using Particle Method, The 14th European Society of Biomechanics (ESB) conference, 2004.
- Y. Feng, S. Wada, K. Tsubota and T. Yamaguchi, A Preliminary 3-D Computational Model on the Genesis and Development of Intracranial Aneurysms, The 14th European Society of Biomechanics (ESB) conference, 2004.
- T. Fukui, S. Wada, K. Tsubota and T. Yamaguchi, Computational Study on the Pulse Wave Velocity of the Atherosclerotic Arteries, The 14th European Society of Biomechanics (ESB) conference, 2004.
- M. Nakamura, S. Wada, S. Yokosawa, H. Isoda, K. Tsubota and T. Yamaguchi, Flow in an Integrated Model of Heart and Aorta, 21st International Congress of Theoretical and

Applied Mechanics, 2004.

- T. Yamaguchi, Computational Mechanical Study of the Blood Flow for the Application to Clinical Cardiovascular Medicine, Spring Workshop of Biomedical Engineering Society for Circulatory Disorders, 2004.
- T. Yamaguchi, Computational Modeling and Mechanical Analysis of the Cardiovascular System for Clinical Application, The 2nd Asian Pacific Conference on Biomechanics, 2005.
- R. Lima, S. Wada, K. Tsubota and T. Yamaguchi, Confocal Micro-PIV Velocity Measurements of Physiological Fluids in a Rectangular Microchannel, The 3rd IASTED International Conference on Biomechanics, 2005.
- T. Yamaguchi, Computational Biomechanics Applied to Cardiovascular Physiology and Medicine, The 12th International Conference on Biomedical Engineering, 2005.
- S. Wada, K. Tsubota and T. Yamaguchi, Red Blood Cell Flow Simulation Based on the Minimum Energy Principle, The 12th International Conference on Biomedical Engineering, 2005.
- M. Nakamura, S. Wada, S. Yokosawa and T. Yamaguchi, Integrated CFD Analysis of the Left Ventricular Flow and the Aortic Hemodynamics, The 12th International Conference on Biomedical Engineering, 2005.
- S. Wada, M. Sato, K. Tsubota and T. Yamaguchi, Dynamical Behavior of Elastic Red Blood Cells in Flowing Blood: Computer Simulation Study, The 12th International Congress of Biorheology (ICB), 2005.
- Y. Feng, S. Wada, K. Tsubota and T. Yamaguchi, A Model-Based Numerical Analysis in the Early Development of Intracranial Aneurysms, 27th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, 2005.
- Y. Feng, S. Wada, K. Tsubota and T. Yamaguchi, A Numerical Model on the Development of Intracranial Aneurysms Considering Fluid Mechanics Dependent Solid Wall Mechanical Property Alterations, ASME Summer Bioengineering Conference, 2005.
- T. Fukui, S. Wada, K. Tsubota and T. Yamaguchi, Differentiation of Vascular Diseases by Pulse Wave Propagation Analysis; Fluid-Solid Interaction Study, ASME Summer Bioengineering Conference, 2005.
- H. Kamada, K. Tsubota, S. Wada and T. Yamaguchi, Computer Simulation of Formation of Primary Thrombus Due to Platelet Aggregation Using Particle Method, ASME Summer Bioengineering Conference, 2005.
- S. Yokosawa, S. Wada, M. Nakamura, K. Tsubota, T. Yamaguchi and H. Isoda, Phase Contrast MRI Measurements and CFD Analysis of Hemodynamics in the Aorta, ASME Summer Bioengineering Conference, 2005.
- K. Tsubota, S. Wada and T. Yamaguchi, Simulation Study on Effects of Hematocrit on Blood Flow using Particle Method, ASME Summer Bioengineering Conference, 2005.
- S. Wada, M. Sato, K. Tsubota and T. Yamaguchi, Computer Simulation of Elastic Red Blood Cell Flow In a Bifurcation, ASME Summer Bioengineering Conference, 2005.
- K. Sato, S. Wada, K. Tsubota and T. Yamaguchi, Computational Study on the Geometric

- Influence of a Lateral Wall Aneurysm on the Hemodynamics, 2nd International Conference on Computational Bioengineering, 2005.
- T. Yamaguchi, S. Wada, K. Tsubota, H. Kamada and Y. Kitagawa, Particle Presentations of Blood Cells and the Plasma in Microvascular Flows, 2nd International Conference on Computational Bioengineering, 2005.
- H. Kamada, K. Tsubota, S. Wada and T. Yamaguchi, Computer Simulation of Formation of Thrombus Using Particle Method, 2nd International Conference on Computational Bioengineering, 2005.
- Y. Kitagawa, S. Wada, K. Tsubota and T. Yamaguchi, Large Scale Computer Simulation of the Behavior of Elastic Red Blood Cells Using Parallel Computation, 2nd International Conference on Computational Bioengineering, 2005.
- R. Lima, S. Wada, K. Tsubota and T. Yamaguchi, Analysis of Velocity Profiles of Blood Flow in Microchannels Using Confocal Micro-PIV and Particle Method, 2nd International Conference on Computational Bioengineering, 2005.
- T. Yamaguchi, Computational Hemodynamics Simulation from Very Small Scale to Large Scale, 2nd International Symposium on Biomedical Engineering, 2006.
- K. Sato, Y. Imai, T. Ishikawa, A. Comerford, T. David and T. Yamaguchi, Numerical Analysis of ATP Transport in Aneurysms, The 2nd Tohoku-NUS Joint Symposium on the Future Nano-medicine and Bioengineering in the East Asian Region, 2006.
- R. Lima, S. Wada, K. Tsubota and T. Yamaguchi, Confocal Micro-PIV Measurements of Blood Flow in Microchannels, 5th World Congress of Biomechanics, 2006.
- K. Tsubota, H. Kamada, S. Wada and T. Yamaguchi, Simulation Study on Effects of Elastic Red Blood Cells on Primary Thrombogenesis Using Particle Method, 5th World Congress of Biomechanics, 2006.
- S. Wada, Y. Kitagawa, K. Tsubota and T. Yamaguchi, Modeling and Computer Simulation of Elastic Red Blood Cell Flow, 5th World Congress of Biomechanics, 2006.
- M. Nakamura, S. Wada, S. Yokosawa and T. Yamaguchi, MRI Measurements and CDF Analysis of Hemodynamics in the Aorta and the Left Ventricle, 5th World Congress of Biomechanics, 2006.
- T. Fukui, K.H. Parker, K. Tsubota, S. Wada and T. Yamaguchi, The Effect of Wall Motion on Arterial Wall Shear Stress, 5th World Congress of Biomechanics, 2006.
- T. Omori, S. Wada, K. Tsubota and T. Yamaguchi, Multi-Scale Simulation of Blood Flow with the Dynamical Behavior of Elastic Red Blood Cells, 5th World Congress of Biomechanics, 2006.
- T. Yamaguchi, Computational Biomechanics of the Cardiovascular System from Micro to Macro Scales, 7th International Symposium on Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering, 2006.
- M. Nakamura, S. Wada and T. Yamaguchi, Effects of the Mitral Valve Opening Mode on the Efficiency of Left Ventricular Flow Ejection, 7th International Symposium on Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering, 2006.
- S. Yokosawa, S. Wada, M. Nakamura, H. Isoda, H. Takeda and T. Yamaguchi, Combined

Magnetic Resonance Imaging and Computational Fluid Dynamics of Blood Flow in a Human Aorta, 7th International Symposium on Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering, 2006.

R. Lima, S. Wada, S. Tanaka, M. Takeda, K. Tsubota, T. Ishikawa and T. Yamaguchi, Velocity Measurements of Blood Flow in a Rectangular PDMS Microchannel Assessed by Confocal Micro-PIV System, World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering, 2006.

Y. Imai, T. Aoki, T. Ishikawa, K. Tsubota and T. Yamaguchi, An Adaptive Mesh Refinement Method for CFD Analysis of Arterial Blood Flow, The 15th International Conference on Mechanics in Medicine and Biology, 2006.

K. Tsubota, S. Wada, Y. Imai, T. Ishikawa and T. Yamaguchi, Computer Simulation of Effects of Deformabilities of Red Blood Cells on Blood Flow Using Particle Method, The 15th International Conference on Mechanics in Medicine and Biology, 2006.

(3) 紀要・解説記事等

T. Yamaguchi, Application of Computational Biomechanics to Clinical Cardiovascular Medicine, In: Biomechanics at Micro- and Nanoscale Levels, pp. 134-143, 2005.

T. Yamaguchi, S. Wada, K. Tsubota, H. Kamada and Y. Kitagawa, Study on Particle Presentations of Blood Cells and the Plasma in Microvascular Blood Flow, In: Biomechanics at Micro- and Nanoscale Levels, Vol. 2, pp. 132-140, 2006.

添 付 資 料

1. Growth of Intracranial Aneurysms Arised from Curved Vessels under the Influence of Elevated Wall Shear Stress - A Computer Simulation Study (JSME International Journal, Series C, Vol. 47, pp. 1035-1042, 2004) p. 11
2. Effect of Flow Disturbances Remaining at the Beginning of Diastole on IntraventricularDiastolic Flow and Colour M-mode Doppler Echocardiograms (Medical and BiologicalEngineering and Computing, Vol. 42, pp. 509-515, 2004)..... p. 19
3. 左心室拡張機能とカラーMモード・ドップラ画像との関係（三次元 CFD モデルによる計算力学的検討）（日本機械学会論文集 A 編, Vol. 70, pp. 1254-1261, 2004） p. 26
4. Correlation of Hemodynamic Events with Clinical and Pathological Observations (Annals of Biomedical Engineering, Vol. 33, pp. 1695-1703, 2005) p. 34
5. Effects of a Ventricular Untwisting on Intraventricular Diastolic Flow and Color M-mode Doppler Echocardiograms (Technology and Health Care Vol. 13, pp. 269-280, 2005)..... p. 43
6. Quantitative Measurements on the Human Ascending Aortic Flow Using 2D Cine Phase-Contrast Magnetic Resonance Imaging (JSME International Journal, Series C, Vol. 48, pp. 459-467, 2005)..... p. 55
7. The Application of Computer Simulation in the Genesis and Development of Intracranial Aneurysms (Technology and Health Care, Vol. 13, pp. 281-291, 2005) p. 64
8. Confocal Micro-PIV Measurements of Three-dimensional Profiles of Cell Suspension Flow in a Square Microchannel (Measurement Science and Technology, Vol. 17, pp. 797-808, 2006)..... p. 75
9. Computational Analysis of Blood Flow in an Integrated Model of the Left Ventricle and the Aorta (Journal of Biomechanical Engineering, Vol. 128, pp. 837-843, 2006)··· p87
10. A Particle Method for Blood Flow Simulation, - Application to Flowing Red Blood Cells and Platelets - (Journal of the Earth Simulator, Vol. 5, pp. 2-7, 2006) p. 94
11. Particle Method for Computer Simulation of Red Blood Cell Motion in Blood Flow (Computer Methods and Programs in Biomedicine, Vol. 83, pp. 139-146, 2006)·· p100

12. Simulation Study on Effects of Hematocrit on Blood Flow Properties Using Particle Method (Journal of Biomechanical Science and Engineering, Vol. 1, pp. 159-170, 2006)
..... p. 108
13. Computational Blood Flow Analysis - New Trends and Methods (Journal of Biomechanical Science and Engineering, Vol. 1, pp. 29-50, 2006)..... p. 120
14. 赤血球の変形能が血流に及ぼす影響 (粒子法シミュレーションによる検討)
(日本機械学会論文集 B 編, Vol. 72, pp. 1483-1489, 2006) p. 142
15. 心臓・血管系の臨床医療を支援する生体力学シミュレーションシステム
(血管医学, Vol. 7, pp. 97-103, 2006) p. 149
16. 血小板の凝集による一次血栓の形成・崩壊の粒子法シミュレーション
(日本機械学会論文集 B 編, Vol. 72, pp. 1109-1115, 2006) p. 156
17. Differentiation of Stenosed and Aneurysmal Arteries by Pulse Wave Propagation Analysis Based on a Fluid-Solid Interaction Computational Method (Technology and Health Care, Vol. 15, pp. 79-90, 2007)..... p. 163
18. Numerical Simulation of a Low-hematocrit Blood Flow in a Small Artery with Stenosis (Journal of Biomechanical Science and Engineering, Vol. 2, pp. 12-22, 2007)··· p. 175
19. Analysis of Destruction Process of the Primary Thrombus under the Influence of the Blood Flow (Journal of Biomechanical Science and Engineering, Vol. 2, pp. 34-44, 2007)..... p. 186
20. In Vitro Confocal Micro-PIV Measurements of Blood Flow in a Square Microchannel: The Effect of the Haematocrit on Instantaneous Velocity Profiles (Journal of Biomechanics, in press, 2007) p. 197
21. Effect of Wall Motion on Arterial Wall Shear Stress (Journal of Biomechanical Science and Engineering, in press, 2007) p. 203

本報告書収録の学術雑誌等発表論文は本ファイルに登録しておりません。なお、このうち東北大学在籍の研究者の論文で、かつ、出版社等から著作権の許諾が得られた論文は、個別に **TOUR** に登録しております。